

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「人間と情報環境の共生インタラクション  
基盤技術の創出と展開」  
研究課題「脳表現空間インタラクション技術の創出」

## 研究終了報告書

研究期間 2018年10月～2024年03月

研究代表者: 柳澤 琢史  
(大阪大学 高等共創研究院 教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1)実施概要

本研究は、**脳と表現空間との新しいインタラクション技術**である rBCI の開発を目的とする。まず、貴島 Gr, 菅野 Gr, 田村 Gr が共同して、**国内最大規模となる多施設共同での皮質脳波計測体制**を構築した。これにより、通常は症例に限られる視覚関連皮質脳波の**ビッグデータ**を得た(国内外のグループに公開)。西本 Gr はヒトが日常生活において経験する**多様な認知・情動・知覚内容**についての**表現空間**を定量化する方法を開発し、その脳内表現を明らかにした(Nakai et al., *Nature Communications.*, 2020, Koide et al., *NeuroImage*, 2020, データ公開済)。柳澤 Gr は、西本 Gr が開発した word2vec を基盤とした表現空間を用いて、皮質脳波から視覚認知内容を推定し、これを closed-loop で適用し、**被験者が想起した画像を画面に提示する rBCI**を開発した(Fukuma et al., *Communications. Biology.*, 2022)。この成果は**世界初の想起画像操作技術**であり、これまでに全くなかった技術の POC を示したことは意義が大きい。特に、ヒトが運動機能によらず、自分の思考だけで外界の情報を操作することは、**筋萎縮性側索硬化症**などで**重度運動麻痺**がある患者にとって、**他に代替する手段がない意思伝達手段**となると考えられ、今後の**医療応用**が期待される。

神谷 Gr は **fMRI 信号から知覚・想起画像を再構成する技術**を開発した。これら脳信号から映像や音楽を生成する技術は、芸術にも応用され、**新しいインタラクション分野を形成**した。また、西本 Gr は fMRI 信号から StableDiffusion を用いて**精細な画像を生成**できることを示し、世界に衝撃を与えた (Takagi et al., *CVPR*, 2023)。

神谷 Gr は、fMRI から生成した画像を、注意によって制御できることを示した(Horikawa et al., *Communications. Biology*, 2021)。また、脳信号から生成された画像が**錯視の内容を反映**することを示し、脳内情報表現と画像再構成の**神経メカニズム**を明らかにした(Cheng et al., *in press*)。さらに、異なる被験者間の**デコーダをつなげる技術**を開発し、ヒトによらない**脳情報解読技術の基盤**を作った(Ho et al., *Neuroimage*, 2023)。これらの知見は rBCI において、**想起や注意で decoding 結果**が変化することの**神経学的基盤**となった。ヒトが、どの程度自分の意図で、外界からのボトムアップの入力を制御でき、トップダウンの意図が、どの程度、ボトムアップの脳内表現を変えるかについて、これまで、ほとんど明らかではなかった。我々は、rBCI の実証と同時に、その原理を支える**神経科学的背景**を示すことで、**神経科学としても重要な成果**を得た。

本研究で得られた基盤技術は、rBCI だけでなく、**診断や治療**など他の臨床応用にも広がった。柳澤 Gr と貴島 Gr では皮質脳波・脳磁図に適用できる **Dynamic mode decomposition** や **DCNN** を用いた**新しい脳情報解読技術**を開発し、**認知症やてんかん**などの**精神神経疾患の診断・治療**にも応用した(Hata et al., *Neuropsychology*, 2023)。また、**幻肢痛**などの**疼痛治療**として**新しい治療法**を開発し、**臨床的な有効性**を示した(Yanagisawa et al., *Neurology*, 2020, Zhang et al., *Current Biology*, 2020, T. Yanagisawa et al., *J. Pain*, 2022)。さらに、**頭蓋内脳波のビッグデータ**から、ヒトの**思考状態**(特に **Mind wandering**)と**海馬 Sharp-wave ripple**との**関係**を明らかにした(Iwata et al., in review)。

以上より、本研究領域では、西本 Gr が明らかにした**包括的な脳表現空間**や、神谷 Gr が明らかにした、**注意・錯視による脳活動変化と生成画像の制御**など、**神経科学として高いインパクト**のある成果をあげ、近年急速に発達した**生成 AI** と脳とを繋げる技術で**社会にインパクト**を与え、さらに、貴島・菅野・田村 Gr で計測した**頭蓋内脳波ビッグデータ**に上記の技術を適用することで、柳澤 Gr が rBCI の POC を示し、**脳情報解読技術の医療応用の可能性**を明らかにした。これらのことから、本研究課題の成果は**社会的インパクトと科学的インパクトの両方において非常に大きい**と評価する。

### (2)顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

#### 1. 脳表現空間の網羅的探索 (Nakai et al., *Nature Communications*, 2020)

概要: 西本 Gr は、103 種類もの大規模な認知課題群を実施する際の脳活動を測定する fMRI 実験を行い、**認知機能と脳活動の関係**を説明する**定量的な情報表現モデル**を世界で初めて構築した。これにより、**認知情報が脳内でどのように表現されているか**を示す**脳内情報表現空間**

間及びその全脳分布を示す情報表現マップを多様な認知機能について作成した。さらに、被験者が実施している認知課題を脳活動から高い精度でデコーディングすることに成功した。

## 2. 注意による画像再構成の制御 (Horikawa et al., *Communications. Biology*, 2021)

概要: 神谷 Gr はヒトの脳活動から再構成される視覚像をトップダウン的注意により制御できることを示した。画像を2枚重ねた刺激を提示し、いずれかの注意の画像に注意を向けさせたときの fMRI 脳活動信号を深層イメージ再構成法で解析したところ、注意にバイアスされた再構成画像が生成された。脳からのイメージ出力を意図的にコントロールできることを示すもので、視覚 BMI の基礎となる成果である。注意で再構成画像を制御する世界初の成果であり、ネットでも話題となった。

## 3. 脳活動からの画像生成 (Takagi et al., *CVPR*, 2023)

概要: 画像生成 AI (Stable Diffusion; SD) と脳の潜在情報表現間の定量的な関係性を解析し、SD の各コンポーネントと脳内における映像・意味表現に特異的な対応があること、脳活動を入力として SD を介した知覚体験の解読が出来ることなどを示した。生成 AI を用いて fMRI から精緻な画像を生成できることを示した世界初の成果であり、一般市民からも多くの注目を集めた。今後の rBCI 構築の基盤として応用が期待される。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

### 1. 脳表現空間インタラクションを用いた新しい意思伝達技術の開発

概要: 多様な意味内容の動画を視聴中の皮質脳波を後頭・側頭葉を中心に計測し、意味内容に対応する表現空間内のベクトルを皮質脳波から推定し、closed-loop で画像を提示することで、ヒトが意図した意味内容を画像化できることを示した。ヒトが想起した複数の意味内容を映像化する技術は、これまでに存在しない。本技術は表現空間を変えることで、想起による画像生成や Web 検索につながり、新しい産業を創出する世界初の革新的技術である。

### 2. 慢性疼痛の rBCI による制御

概要: 幻肢痛は、幻の腕に激しい痛みを伴う病気で、確立した治療法がなく、患者の社会復帰を妨げる難治性疼痛である。我々は脳磁図を用いて幻肢運動の脳情報解読を行い、これに基づいて動く画像を操作する訓練を患者が行うことで、幻肢の脳内表現を変え、幻肢痛を治療できることを示した。特に、旧来の治療法よりも有効率が高いことが示唆された。難治性疾患に有効な DTx を提案したことで、今後の医療応用など社会的インパクトが大きい。

### 3. Dynamic mode decomposition などを用いた脳波診断技術の開発

概要: Dynamic mode decomposition (DMD) や DCNN を用いた脳情報解読技術を開発した。DMD のモード間距離を principle angle で評価することに対応するベクトル表現を得る方法を開発した。また、DCNN や DMD 特徴を用いることで、認知症やてんかんを安静時脳波から診断できることを示した。今後、神経疾患のスクリーニング検査等の臨床応用が期待される。

< 代表的な論文 >

#### 1. T. Nakai and S. Nishimoto, “Quantitative models reveal the organization of diverse cognitive functions in the brain.”, *Nature Communications* 11, 1142, 2020

概要: 西本グループは、103 種類もの大規模な認知課題群を実施する際の脳活動を測定する fMRI 実験を行い、認知機能と脳活動の関係を説明する定量的な情報表現モデルを構築した。これにより、認知情報が脳内でどのように表現されているかを示す脳内情報表現空間及びその全脳分布を示す情報表現マップを多様な認知機能について作成した。さらに、被験者が実施している認知課題を脳活動から高い精度でデコーディングすることに成功した。

#### 2. R. Fukuma, T. Yanagisawa\*, S. Nishimoto, H. Sugano, K. Tamura, S. Yamamoto, Y. Iimura, Y. Fujita, S. Oshino, N. Tani, N. Koide-Majima, Y. Kamitani, H. Kishima, Voluntary control of semantic neural representations by imagery with conflicting visual stimulation, *Communications Biology*, 5:214, 2022

概要:多様な意味内容の動画を視聴中の皮質脳波を後頭・側頭葉を中心に計測し、皮質脳波から意味内容を表すベクトルを推定できることを示した。さらに、同ベクトルを元に被験者へ画像フィードバックを行い、被験者が意図した意味内容の画像を提示できることを示した。また、画像知覚中にも想起によって脳活動を想起した意味方向へ変えられることを示した。世界で初めてヒトが想像によって画像を制御できることを示し話題となった。

### 3. F. Cheng, T. Horikawa, K. , S.Aoki, M. Abdelhack, M. Tanaka, Y. Kamitani, Reconstructing visual illusory experiences from human brain activity, *in press*

概要:本研究では、ヒトの視覚イメージにもとづく BMI の可能性を探求するため、錯視画像を見ているときの被験者の脳活動から、主観的錯視像の再構成を試みた。脳デコーディング技術と深層ニューラルネットワークを利用し、錯視イメージを画像として再構築する方法を確立した。実験の結果、主観的錯覚像と一致する線と色を含む再構成画像が得られた。この成果は、視覚イメージにもとづく BMI に神経科学的基盤を与え、心を計測する新たな研究パラダイムを示唆するものである。

## §2 研究実施体制

### (1)研究チームの体制について

本研究は下記の5グループによって実施した。神経科学グループ(神谷、西本)と臨床グループ(貴島、菅野、田村)を、研究代表が務める総括グループがつなぐ役割をする。神経科学グループは主にfMRIを用いてrBCIの神経科学的メカニズム解明や表現空間の作成を目標とする。また、臨床グループは、頭蓋内脳波のビッグデータを得る。代表グループは、得られた頭蓋内脳波に対して、神経科学グループの開発した技術を適用しrBCIを実現する。

#### ①柳澤グループ

研究代表者:柳澤 琢史(大阪大学高等共創研究院 教授)

研究項目

- ・ 皮質脳波による視覚情報解読技術開発
- ・ 視覚野皮質脳波による rBCI の検証
- ・ 皮質脳波 rBCI による意思伝達法の開発
- ・ rBCI による皮質可塑性誘導の検証
- ・ 低侵襲 rBCI の開発
- ・ 皮質脳波による思考・気分解読技術の開発

#### ②神谷グループ

主たる共同研究者:神谷 之康(国際電気通信基礎技術研究所・神経情報学研究室 客員室長)

研究項目

- ・ 想起画像の可視化技術開発
- ・ rBCI の神経基盤解明

#### ③西本グループ

主たる共同研究者:西本 伸志(大阪大学大学院生命機能研究科 教授)

研究項目

- ・ 意味空間による脳表現空間の開発
- ・ rBCI による Web 検索技術の開発

#### ④貴島グループ

主たる共同研究者:貴島 晴彦(大阪大学大学院医学系研究科脳神経外科 教授)

研究項目

- ・ 皮質脳波ビッグデータの形成
- ・ 視覚野皮質脳波による rBCI の検証

- ・ 皮質脳波による思考・気分測定
- ・ 低侵襲 rBCI の開発

⑤菅野グループ

主たる共同研究者:菅野 秀宣(順天堂大学脳神経外科 先任准教授)

研究項目

- ・ 皮質脳波ビッグデータの形成
- ・ 視覚野皮質脳波による rBCI の検証
- ・ 皮質脳波による思考・気分測定

⑥田村グループ

主たる共同研究者:田村 健太郎(奈良県立医科大学脳神経外科 学内講師)

研究項目

- ・ 皮質脳波ビッグデータの形成
- ・ 視覚野皮質脳波による rBCI の検証
- ・ 皮質脳波による思考・気分測定

(2)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

- 慢性疼痛の治療に関して、オックスフォード大学の Ben Seymour 先生との共同研究を進めている。
- ヒトの思考内容を頭蓋内脳波から解読する技術を開発するため、カナダ・クイーンズ大学の Smallwood 教授と共同研究を行っている。
- 本研究で得られた皮質脳波ビッグデータについては、個人情報情報を排除した形で、本研究チーム以外の研究グループとも共有を進めている。
- てんかんや認知症などの神経疾患診断を目的とした頭蓋内脳波、脳波、脳磁図のビッグデータ形成を、国内外の医療機関と共同で進めている。